La rappresentazione del suono. Rilievo digitale e modellazione 3D per la virtualizzazione multisensoriale di tre grandi teatri europei

Andrea Lumini
Federico Cioli

Abstract

Il paper presenta e mette a confronto le esperienze di rilievo digitale e modellazione 3D condotte per tre grandi teatri europei: il Konzerthaus di Berlino (DE), il Teatro del Maggio Musicale Fiorentino a Firenze (IT) e il Teatro dell'Opera e del Balletto di Leopoli (UA), i cui risultati rientrano all'interno delle attività del progetto europeo *AURA - Auralisation of acoustic heritage sites using Augmented and Virtual Reality*, cofinanziato dal 2021 dal programma Europa Creativa.
La ricerca ha previsto lo sviluppo di una metodologia spendibile e applicabile su scala europea, finalizzata alla creazione di affidabili ambienti virtuali multisensoriali per supportare e incoraggiare nuove opportunità di fruizione e diffusione del Patrimonio Musicale per le Industrie Culturali e Creative (ICC).
Il suo sviluppo si è basato su diverse modalità di modellazione 3D dei tre casi studio - differenti sul piano storico, artistico e architettonico - supportate da rilievi digitali *reality-based* e classificazioni semantiche degli elementi presenti e dei rispettivi materiali, al fine di studiarne le caratteristiche acustiche ed implementarne i risultati all'interno di processi di auralizzazione, una tecnica per ricreare ambienti sonori virtuali rispondenti all'acustica del luogo reale.
Il progetto, infine, attraverso la creazione di queste esperienze immersive in VR, mira ad indagare la reciproca influenza tra la visualizzazione dello spazio architettonico e l'auralizzazione del paesaggio acustico e come queste condizionano la percezione all'interno dell'ambiente virtuale.

Parole chiave
Auralizzazione, virtual reality, AURA, patrimonio acustico, Europa Creativa

Topic
Simulare

Il Progetto Europeo AURA per la rappresentazione del suono

doi.org/10.3280/oa-832-c163

Introduzione

Le Industrie Culturali e Creative (ICC) sempre più si orientano verso l'implementazione di moderne tecnologie per esplorare nuovi orizzonti commerciali e attrarre nuovo pubblico [Bertocci et al. 2021]. Questa spinta è stata accelerata negli ultimi due anni dalla pandemia di COVID-19 che ha evidenziato l'urgenza di sviluppare proposte alternative per la fruizione del Patrimonio Artistico e Culturale.
Lo studio in questione fa parte del progetto AURA - *Auralisation of Acoustic Heritage Sites Using Augmented and Virtual Reality*, cofinanziato dal 2021 dal bando Europa Creativa, il cui obiettivo prevede di esplorare il potenziale dell'auralizzazione – una tecnica che consente di simulare l'acustica di un determinato luogo all'interno di modelli [Kleiner et al. 1993] – coniugandola con le rappresentazioni visive del mondo virtuale, al fine di creare un'esperienza multisensoriale che rispecchi l'aspetto e l'acustica del luogo reale (fig. 01).

Fig. 01. Il Progetto Europeo AURA, la sua partnership e i tre casi studio: il Konzerthaus di Berlino (DE) (© Felix Löchner Sichtkreis), il Teatro del Maggio Fiorentino a Firenze (IT) (© Michele Monasta), e il Teatro dell'Opera e del Balletto di Leopoli (UA) (© Ruslan Lytvyn)

La tematica dell'acustica è infatti sempre più dibattuta anche nell'ambito della documentazione e della salvaguardia del patrimonio culturale.
Nel 2017 l'UNESCO introduce il documento "The importance of sound in today's world: promoting best practices" [UNESCO 2017], evidenziando come il paesaggio sonoro dei luoghi esistenti o storici - l'insieme dei suoni, naturali e artificiali, che caratterizzano un determinato luogo - meriti riflessione, conservazione e studio scientifico [Katz et al. 2020].
Queste caratteristiche acustiche mutano nel tempo e contribuiscono a strutturare la memoria storica di un luogo, rivestendo un ruolo fondamentale nella percezione e nella fruizione dell'ambiente costruito.
L'acustica di un'architettura è infatti una conseguenza immateriale della sua costruzione, dei materiali utilizzati e del sistema di arredo, che costituiscono gli aspetti tangibili del patrimonio e che ne condiziona le scelte progettuali.

Per raggiungere l'obiettivo di AURA sono stati così esaminati tre emblematici casi studio a livello europeo - il Konzerthaus di Berlino (DE), il Teatro del Maggio Musicale Fiorentino a Firenze (IT) e il Teatro dell'Opera e del Balletto di Leopoli (UA) - per ognuno dei quali è stata concepita un'appropriata metodologia dedicata alla digitalizzazione e ricostruzione virtuale, con il fine di ottenere attendibili asset su cui impostare i successivi processi di auralizzazione e, a seguito di questi, sviluppare modelli 3D multisensoriali, affidabili e performanti sia in termini di resa grafica e fruizione virtuale, sia in termini di acustica.

Il workflow metodologico

Il presente paper illustra le fasi metodologiche preliminari affrontate nel progetto AURA in riferimento alle attività di rilievo digitale e modellazione 3D dei tre casi studio (tab. 01).
In particolare, il workflow metodologico condotto ha previsto un'iniziale fase di rilievo digitale mediante TLS, necessaria sia per assicurare una base metrica affidabile su cui elaborare la modellazione 3D delle sale principali, sia per ottenere una rappresentazione altamente descrittiva dello stato attuale degli edifici e dei loro ambienti interni.
In contemporanea a questa, sono state sviluppate una suddivisione semantica degli elementi e una classificazione dei corrispettivi materiali costruttivi, sulla base delle quali è stata portata avanti un'indagine sui valori relativi ai parametri acustici dei rispettivi materiali presenti [1], al fine di creare un database acustico parametrico e debitamente codificato a supporto delle successive procedure di auralizzazione.
Quest'ultime, come anche tutte le altre operazioni di virtualizzazione, sono state sviluppate sfruttando le molteplici potenzialità offerte dal software *Unreal Engine*.
Questa piattaforma permette infatti, mediante specifici plugin [2], sia l'interazione tra diverse tipologie di asset, quali modelli 3D texturizzati e nuvole di punti colorate, allo scopo di simulare e ottimizzare l'*ArchViz* degli ambienti, sia la loro auralizzazione, attraverso l'impostazione di sorgenti musicali e materiali fonici associati ai valori dei parametri acustici indagati e alle rispettive superfici dei modelli 3D importati.
A scopo esemplificativo di questo workflow operativo comune ai tre casi, viene di seguito esposto per ognuno di questi un aspetto metodologico specifico affrontato durante questa esperienza di ricerca, concentrandosi in particolare sulle attività di rilievo digitale, modellazione 3D e interazione virtuale tra i vari asset elaborati, ovvero su tutte quelle operazioni propedeutiche ai processi di auralizzazione.

Il rilievo digitale del Konzerthaus di Berlino

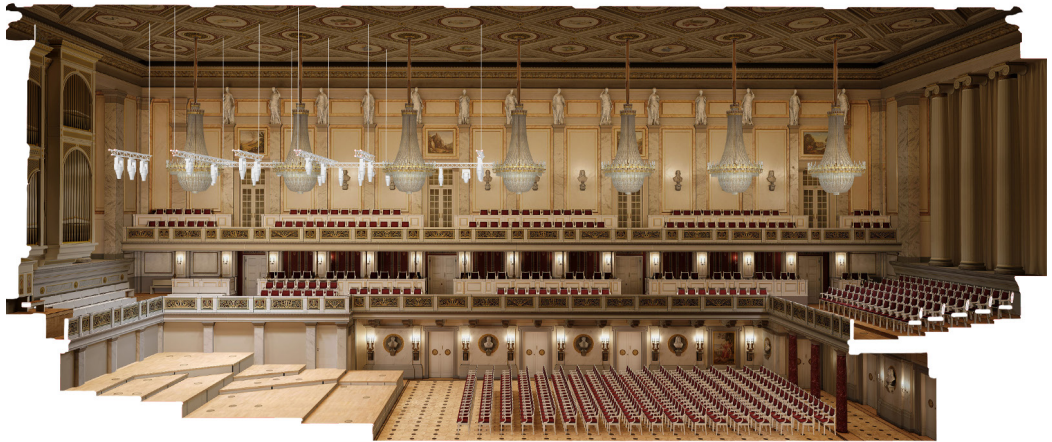
Il Konzerthaus di Berlino è un edificio in stile neoclassico originariamente costruito su progetto dell'architetto Karl Friederich Schinkel sul sito del Teatro Nazionale di Carl Gotthard Langhans, distrutto da un incendio nel 1817.
Nasce come teatro di prosa nel centro di Gendarmenmarkt, un'ampia piazza del quartiere Mitte caratterizzata dalla presenza di due chiese simmetriche, il Deutcher Dom e il Französischer Dom.
Distrutto dai bombardamenti durante la Seconda Guerra Mondiale, l'edificio fu ricostruito e riaperto solo nel 1984 come sala da concerti. Il rifacimento novecentesco ha mantenuto fedeli i prospetti esterni ma ha alterato significativamente gli ambienti interni, con la scomparsa della sala da teatro all'italiana, sostituita da una copia ampliata di quello che era il precedente auditorium [Steffens 2004].
Le attività di documentazione, svolte a settembre 2021, sono state portate avanti con un laser-scanner Z+F 5016H per gli esterni, la piazza Gendarmenmarkt, il foyer e la sala principale, e con un Faro Focus M70 per i vani scala e le sale laterali, acquisendo un totale di circa 500 scansioni a colori (fig. 02).

		KHB		MAG		LEO	
		int	ext	int	ext	int	ext
DIGITAL SURVEY							
ACQUISITION	*RGB TLS digital survey*	■	■	■	■	■	■
	SfM photogrammetric survey					■	
	On-site study on acoustic parameters	■	■	■	■	■	■
	On-site photographic survey for materials sampling			■			
PROCESSING	*Scans registration*	■	■	■	■	■	■
	SfM photogrammetric processes					■	
RESULTS	*RGB range-based point cloud*	■	■	■	■	■	■
	RGB image-based point cloud					■	
	2D CAD graphical drawings	■	■	■	■	■	■
3D MODELING							
PRELIMINARY PHASE	*Elements semantic subdivison*	■	■	■	■	■	■
	Materials classification	■	■	■	■	■	■
	Parametric & coded acoustic database	■	■	■	■	■	■
RECONSTRUCTION	*Morphological transformations on existing assets*	■					
	NURBS 3D modeling processes			■		■	
	Texturing processes			■			
INTERACTION							
PRELIMINARY PHASE	*Decimation of RGB point clouds*		■		■	■	■
ASSETS INTE-RACTION	*TLS RGB point cloud + SfM RGB point clouds + 3D model*	■	■	■	■	■	■
	Creation and optimization of the virtual environment	■	■	■	■	■	■
	Surfaces implementation of acoustic parameters values	■		■		■	
AURALIZATION							
PRELIMINARY PHASE	*Importing musicists avatars*	■		■		■	
	Importing and implementation of audio anechoic sources	■		■		■	
AURALIZATION PHASE	*Setting of specific interactive hotspots*	■		■		■	
	Spatialiation and acustic simulation	■		■		■	
VIRTUALIZATION							
VR APPLICATION	*Creation of a multisensorial immersive experience*	■	■	■	■	■	■

Tab. 01. Workflow metodologico delle attività svolte per ogni caso studio

La grande mole di dati ottenuta dalla campagna di rilievo laser-scanner è stata successivamente elaborata all'interno del software *Leica Cyclone 2020*, mediante il quale è stata portata avanti la registrazione e la verifica di affidabilità dell'allineamento delle nuvole di punti. La porzione di nuvola di punti relativa alla sala principale è stata unificata, esportata, decimata e, successivamente, è diventata il supporto metrico per l'adattamento dimensionale del modello 3D (fig. 03A). Infatti, in qualità di partner del progetto AURA, l'istituzione del Konzerthaus ha messo a disposizione un modello 3D texturizzato della sala principale, elaborato precedentemente per un altro progetto (fig. 03B). Tuttavia, a seguito di specifiche analisi morfologiche condotte, è emerso che questo modello non rispecchiava metricamente i reali aspetti dimensionali del complesso, rendendo di fatto necessarie alcune modifiche morfologiche basate sulla più attendibile nuvola di punti. Il modello originale della sala è stato così ridimensionato tramite specifiche operazioni di trasformazione morfologica e riferito al sistema di coordinate impostato per la nuvola di punti globale, in modo da poterlo integrare all'interno del contesto ambientale della piazza (fig. 03C).

Fig. 02. Vista panoramica della nuvola di punti a colori dell'ambiente esterno del Konzerthaus di Berlino

Successivamente, come vedremo anche per gli altri casi, è stata elaborata una classificazione semantica degli elementi presenti nella sala principale e per ciascuno di questi è stato assegnato un materiale diverso, allo scopo di facilitare l'associazione dei rispettivi valori acustici per lo sviluppo dei successivi processi di auralizzazione (fig. 03D).

La modellazione 3D del teatro del Maggio Musicale Fiorentino

Il Teatro del Maggio Musicale Fiorentino, ideato dall'architetto Paolo Desideri dello studio ABDR e inaugurato a dicembre 2011, rappresenta uno dei più rilevanti interventi progettuali contemporanei nella scena architettonica fiorentina. Al suo interno ospita, oltre a numerose sale minori, tre ampi luoghi teatrali: un auditorium di recente apertura, una cavea all'aperto e la sala principale del teatro dell'opera, racchiusa all'interno di un volume stereometrico a forma di "ferro di cavallo" [Reinhold, Conta 2012]. La fase di documentazione morfologica del complesso è stata portata avanti da gennaio 2021 e ha riguardato l'acquisizione dei suoi dati geometrici e cromatici mediante due diversi TLS, ottenendo rispettivamente un totale di 180 scansioni a colori con uno Z+F 5016H e 120 in B/N con un Faro Focus M70.

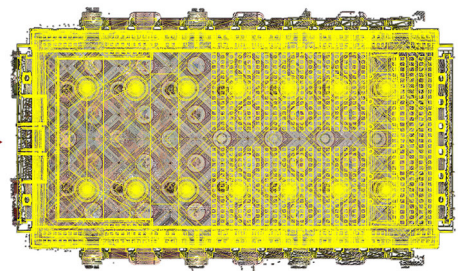
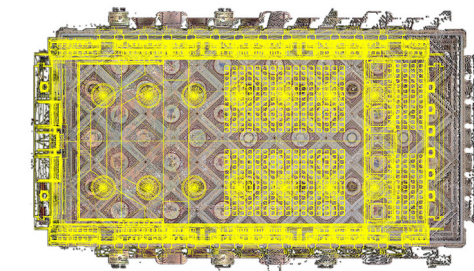
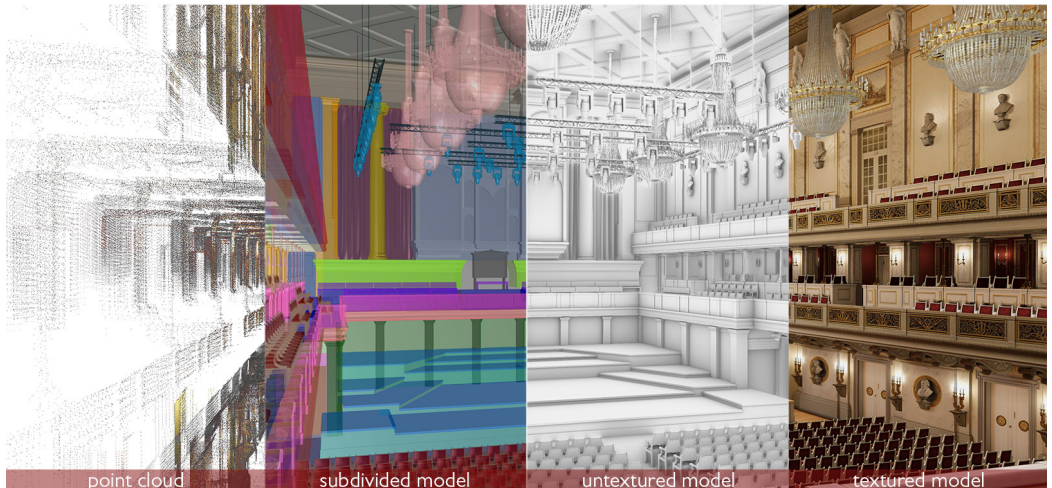



Fig. 03. Elaborazioni digitali svolte per la virtualizzazione del caso studio del Konzerthaus di Berlino

Queste hanno poi subito il medesimo processo di elaborazione descritto precedentemente, dal quale è stata ottenuta una nuvola di punti globale che è divenuta sia la base metrica per le fasi di restituzione grafica e modellazione 3D della sala principale (fig. 05A), sia il background ambientale per la virtualizzazione delle aree esterne a questa. L'elaborazione tridimensionale è stata condotta all'interno del software *Rhinoceros*, mediante il quale, sfruttando le potenzialità della modellazione NURBS, è stato realizzato il modello 3D della sala principale e dei suoi elementi, basato su elaborati 2D restituiti dai dati range-based e, per alcune geometrie complesse, direttamente su porzioni di nuvola di punti decimata (fig. 05B). Come esposto precedentemente, le operazioni di modellazione sono state condotte riferendosi ad una suddivisione semantica e materica delle componenti architettoniche presenti, catalogandole in categorie tipologiche e associandone materiali virtuali codificati (fig. 05C). Questi hanno così permesso di creare un database su cui riportare i risultati delle indagini acustiche condotte sui valori dei parametri sonori da associare alle varie superfici (fig. 05E) [Pompoli, Prodi 2000]. Da questo punto di vista è stata ritenuta di grande importanza, oltre alla modellazione degli elementi architettonici della sala, anche quella dei sistemi dei riflettori acustici, come i pannelli per lo *scattering* o le tende acustiche, e degli elementi di arredo, come le poltrone, la cui ampia presenza (oltre 1700) è estremamente rilevante nello studio acustico della sala, e di conseguenza, nei processi di auralizzazione (figg. 05C, 05D). Infine, prima di procedere a questi e alla virtualizzazione immersiva su *Unreal Engine*, sono state condotte campagne fotografiche finalizzate al campionamento dei reali materiali presenti nella sala, per ognuno dei quali è stata creata una texture fotorealistica con cui, all'interno del software *Twinmotion*, sono state mappate tutte le superfici del modello 3D, ottimizzandone la resa grafica per l'*ArchViz* (figg. 04, 05F) [Bertocci et al. 2022].

L'interazione tra modelli 3D, dati *image-based* e dati *range-based* RGB per la fruizione virtuale del Teatro dell'Opera e del Balletto di Leopoli

Il Teatro dell'Opera e del Balletto di Leopoli, in Ucraina, venne edificato alla fine del XIX secolo a seguito di un grande concorso indetto dalla città, all'epoca capitale austro-ungarica della Galizia. Il progetto vincitore risultò essere quello presentato da Zygmunt Gorgolewski, che propose la collocazione del teatro proprio al centro della città, nonostante l'impedimento ambientale del fiume Poltva, prevedendone l'interramento nell'area di edificazione del nuovo complesso e predisponendo per questo uno tra i primi esempi in Europa di fondamenta in cemento armato. Il teatro, costruito in stile neobarocco con alcuni elementi Art Nouveau, e arricchito da stucchi, statue e dipinti ad olio, ospita un'ampia sala all'italiana altamente decorata e conclude, all'esterno, un lungo viale alberato che negli anni è divenuto il fulcro del centro storico, oggi sotto protezione UNESCO [Sajo, 2013]. La fase di rilievo digitale è stata condotta in due diverse tranches temporali: la prima ad inizio 2021, in cui sono stati acquisiti

Fig. 04. Vista panoramica del modello 3D texturizzato della sala principale del caso studio del Teatro del Maggio Musicale Fiorentino

Fig. 05. Panoramica delle elaborazioni digitali svolte per la virtualizzazione del caso studio del Teatro del Maggio Musicale Fiorentino

i dati geometrici interni della sala, del foyer e dei corridoi con 160 scansioni in B/N mediante un TLS Leica C10, e quelli cromatici attraverso rilievi fotogrammetrici SfM (fig. 07B); mentre nella seconda, condotta a fine 2021, sono state acquisite mediante un Faro Focus M70 altre 160 scansioni a colori descrittive delle aree esterne e, nuovamente, degli ambienti interni, al fine di garantire una copertura omogenea globale dei dati *range-based* RGB (figg. 07A, 07C). I dati acquisiti sono stati poi processati secondo metodi ampiamente descritti, sviluppando nuvole di punti a diversi livelli di dettaglio metrico e grafico (figg. 07A, 07B, 07C). Quella in B/N della sala, geometricamente più definita, è stata infatti sfruttata per la realizzazione di un modello NURBS non texturizzato dell'ambiente teatrale, anch'esso caratterizzato dalle suddivisioni semantiche e materiche necessarie per l'auralizzazione (fig. 07D). Quelle dotate di dati RGB invece, sviluppate dalla fotogrammetria e dal secondo rilievo TLS, sono state dapprima integrate fra loro per compensare eventuali coni d'ombra, e successivamente, sottoposte ad operazioni di pulitura del dato, al fine di ottenere una nuvola di punti globale a colori che simulasse visivamente l'ambiente reale. Per questo progetto di virtualizzazione immersiva è stato così deciso di sperimentare l'interazione tra queste due tipologie di asset, inserendo all'interno dello stesso ambiente virtuale di *Unreal Engine* - e secondo le medesime coordinate - sia il modello 3D dotato di superfici associate ai parametri acustici di ogni materiale, sia la nuvola di punti a colori dell'intero complesso (fig. 07E).
I due asset 3D, sovrapposti l'uno con l'altro e reso il primo invisibile durante l'esperienza di VR, hanno così garantito sia la simulazione acustica ambientale sviluppata dall'auralizzazione del modello 3D, sia la resa grafica realistica del complesso teatrale e del suo contesto grazie alla nuvola di punti colorata (figg. 06, 07F) [Bertocci et al. 2022].

Conclusioni

Gli sviluppi nell'ambito del rilievo laser-scanner permettono oggi di elaborare dati sempre più affidabili e altamente descrittivi grazie all'integrazione di camere ad alta risoluzione che acquisiscono il dato colore RGB, istituendo nuvole di punti 3D che possono essere fruite in ambiente virtuale, sfruttando a pieno la grande mole di dati acquisita [Cioli, Ricci 2020].
Il progetto AURA mira, infatti, a realizzare modelli multisensoriali, affidabili e performanti sia in termini di resa grafica e fruizione virtuale, sia in termini di acustica, sfruttando l'integrazione delle nuvole di punti all'interno di motori grafici come *Unreal Engine*.

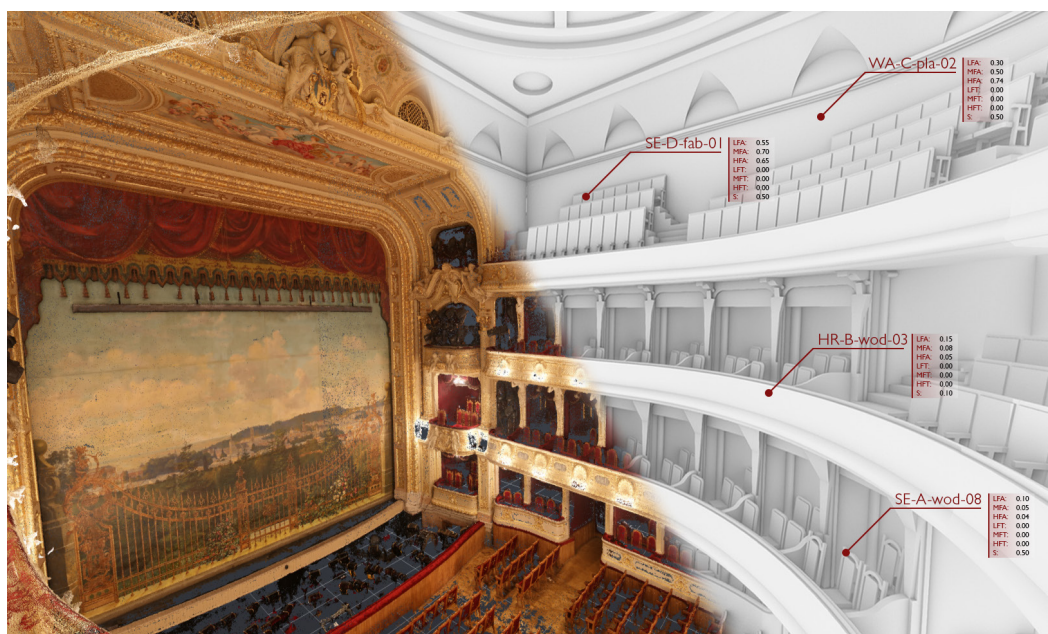



Fig. 06. Vista panoramica della sala principale del caso studio di Leopoli descrittiva dell'interazione tra diversi asset virtuali: nuvole di punti colorate sviluppate da acquisizioni TLS e SfM, e modelli 3D con superfici suddivise per materiali e implementate con i rispettivi valori dei parametri acustici

Fig. 07. Panoramica delle elaborazioni digitali svolte per la virtualizzazione del caso studio del Teatro dell'Opera e del Balletto di Leopoli

Seguendo questi step metodologici sono state così ottenute tre applicazioni VR che permettono all'utente di navigare la nuvola di punti degli esterni del teatro e del suo foyer, per poi entrare nello spazio modellato della sala principale, dove scegliendo liberamente una posizione potrà sperimentare un'esperienza percettivamente multisensoriale, associando la rappresentazione visuale immersiva ad una simulazione virtuale acustica tangibile. Attraverso l'integrazione tra l'auralizzazione e un'affidabile e realistica esperienza visiva, basata su dati acquisiti mediante tecniche integrate di rilievo digitale TLS e fotogrammetrico *Structure from Motion* (SfM), è possibile indagare la reciproca influenza che gli stimoli visivi ed acustici hanno nella percezione dell'esperienza virtuale.
La finalità del progetto è quello di sviluppare nuove opportunità di fruizione attraverso il coinvolgimento di utenti esperti e non esperti, promuovendo l'innovazione e la collaborazione intersettoriale per costruire un nuovo pubblico, modelli di business, pratiche di performance ed esperienze coinvolgenti [Bertocci et al. 2021].

Note

[1] I parametri acustici considerati per l'auralizzazione sono tre: le frequenze di assorbimento e trasmissione sonora (basse, medie e alte) e lo *scattering*.

[2] Lidar Point Cloud e Valve Steam Audio

Crediti

Si deve a Federico Cioli la redazione dei paragrafi "Introduzione", "Il rilievo digitale del Konzerthaus di Berlino" e "Conclusioni". Si deve ad Andrea Lumini la redazione dei paragrafi "Il workflow metodologico", "La modellazione 3D del teatro del Maggio Musicale Fiorentino" e "L'interazione tra modelli 3D, dati *image-based* e dati *range-based* RGB per la fruizione virtuale del Teatro dell'Opera e del Balletto di Leopoli".

I crediti dei contenuti delle figg. 00, 01 appartengono a Felix Löchner Sichtkreis per la foto del Konzerthuas di Berlino, a Michele Monasta per la foto del Teatro del Maggio Musicale Fiorentino e a Ruslan Lytvyn per la foto del Teatro dell'Opera e del Balletto di Leopoli. Elaborazione grafica ad opera degli autori.

I crediti dei contenuti e dell'elaborazione grafica delle figg. 02, 03, 04, 05, 06, 07 appartengono e sono ad opera degli autori.

AURA è un progetto co-finanziato dal programma Europa Creativa guidato dalla Berliner Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit mbH (BGZ), in collaborazione con partner accademici tedeschi della Hochschule für Technik und Wirtschaft di Berlino (HTW), italiani dei Dipartimenti di Architettura (DIDA) e Ingegneria Industriale (DIEF) dell'Università di Firenze (UNIFI) e ucraini della Lviv Polytechnic National University (LPNU), supportati da istituzioni musicali come la Konzerthaus di Berlino e da partner di marketing come Vie en.ro.se. Ingegneria Srl di Firenze, il Centro di Sviluppo Turistico di Leopoli di Lviv (UA) e Magnetic One di Ternopil (UA).

Per ulteriori informazioni, consultare il sito web del progetto europeo: https://www.aura-project.eu.

Vengono infine presentati sinteticamente i crediti delle attività svolte dai rispettivi partner tecnici del progetto AURA. Il team di HTW, coordinato dal dal Prof. J. Sieck., si è occupato dell'auralizzazione dei modelli e dello sviluppo di app per la loro virtualizzazione e fruizione. Il team di UNIFI-DIDA, coordinato dal Prof. S. Bertocci, ha svolto le attività di rilievo digitale ed elaborazione dati, nonché della modellazione 3D dei teatri. Il team di UNIFI-DIEF, coordinato dalla Prof.ssa M. Carfagni, si è occupato dell'indagine propedeutica all'auralizzazione sui valori da assegnare ai parametri acustici. Il team di LPNU, coordinato dal Prof. I. Savchyn, ha svolto le prime attività di rilievo digitale, TLS e SfM, del caso studio di Leopoli. L'istituzione musicale del Konzerthaus ha messo a disposizione il modello texturizzato del teatro di Berlino.

Riferimenti bibliografici

Bartalucci, C. et al. (2018). The Acoustic Design and Requalification of an Auditorium in a Church and of a Historical Theater. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Atti del convegno Florence Heri-Tech - The Future of Heritage Science and Technologies 16–18 Maggio 2018, Florence, Italy, vol. 364, pp. 1-8.

Bertocci S. et al. (in corso di stampa). Virtual reconstruction and 3D modeling for the auralization of acoustic Heritage: the case study of the Teatro del Maggio in Florence. In W. Börner, S. Uhlirz (Eds.). *Proceedings of CHNT 2021. 26th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies*. Vienna, Austria, 02-04 Novembre 2021. Heidelberg: Propylaeum.

Bertocci S. et al. (2021). Il progetto AURA: proposta di auralizzazione di alcuni teatri europei per la creazione di paesaggi sonori virtuali. In *Paesaggio Urbano - Urban Design, 2*(2), pp. 84-89.

Cioli F., Ricci Y. (2020). L'Officina Profumo-Farmaceutica di Santa Maria Novella. From the Point Cloud to the Virtual Reality. In Arena A., Arena M., Brandolino R. G., Colistra D., Ginex G., Mediati D., Nucifora S., Raffa P. (Eds). *Proceedings of UID 2020 - Connettere. Un disegno per annodare e tessere. 42° Convegno Internazionale dei docenti delle discipline della Rappresentazione*. Reggio Calabria e Messina, Italia, 17-19 Settembre 2020, pp. 1958-1973. Milano: FrancoAngeli,

Katz B. et al. (2019). Virtual reconstructions of the Théâtre de l'Athénée for archeoacoustic study, In *Proceedings of ICA 2019 - 23rd International Congress on Acoustics*. Aachen, Germany, 9-13 Settembre 2019, pp. 302-310. Red Hook (NY-USA): Curran Associates, Inc.

Katz B. et al. (2020). The Past Has Ears (PHE): XR Explorations of Acoustic Spaces as Cultural Heritage. In De Paolis L., Bourdot P. (Eds). 7° International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics, AVR 2020. Lecce, Italia, 7-10 Settembre 2020, vol. 12243, pp. 91-98. Cham: Springer.

Kleiner M. et al. (1993). Auralization - An overview. In *Journal of the Audio Engineering Society, 11*(41), pp. 861-875.

Pompoli R., Prodi N. (2000). Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: procedures and validation. In *Journal of Sound and Vibration, 232*(1), pp. 281-301.

Reinhold J., Conta S. (2012). L'acustica del nuovo teatro dell'opera di Firenze: scelte innovative in un teatro (quasi) classico. In *Proceedings of AIA - 39° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica*. Roma, 4-6 Luglio 2012, pp. 1-6.

Sajó T. (2013). Urban Space as Erinnerungslandschaft. The Case of Lemberg/Lwów/Lvov/Lviv. In *European Review, 21*(4), pp. 523-529.

Steffens M. (2004). *K. F. Schinkel 1781-1841 un artista al servizio della bellezza (Basic art).* Köln: Taschen.

UNESCO (2017). The Importance of sound in today's world: promoting best practices. In *39° UNESCO General Conference, 39 C/49*. Parigi, 25 Settembre 2017 <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000259172> (consultato il 10 Febbraio 2021)

Weinzierl S., Lepa S. (2019). On the Potential of Virtual Realities for the Sciences. A Methodological Framework. In Ariso M. J. (Ed.). *Augmented Reality. Reflections on Its Contribution to Knowledge Formation*. Berlin / Boston: De Gruyter, pp. 61-80.

Autori
Andrea Lumini, Università di Firenze, DIDA, andrea.lumini@unifi.it
Federico Cioli, Università di Firenze, DIDA, federico.cioli@unifi.it

Per citare questo capitolo: Lumini Andrea, Cioli Federico (2022). La rappresentazione del suono. Rilievo digitale e modellazione 3D per la virtualizzazione multisensoriale di tre grandi teatri europei/The representation of sound. Digital survey and 3D modeling for the multisensory virtualization of three major European theaters. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare. Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers.* Milano: FrancoAngeli, pp.2621-2644.

Isbn 9788835141938

The representation of sound. Digital survey and 3D modeling for the multisensory virtualization of three major European theaters

Andrea Lumini
Federico Cioli

Abstract

The paper presents and compares the digital survey and 3D modeling experiences carried out for three major European theaters: the Konzerthaus in Berlin (DE), the Teatro del Maggio Musicale Fiorentino in Florence (IT) and the Opera and Ballet Theatre in Lviv (UA), whose results are part of the activities of the European project *AURA - Auralisation of acoustic heritage sites using Augmented and Virtual Reality*, co-funded since 2021 by the Creative Europe program.
The research has provided the development of a spendable and applicable methodology on a European scale, aimed at creating reliable multisensory virtual environments to support and encourage new opportunities for the fruition and dissemination of Acoustic Heritage for Cultural and Creative Industries (CCI).
Its development was based on different 3D modeling approaches to the three case studies - different in terms of history, art and architecture - supported by reality-based digital surveys and semantic classifications of the elements present and their respective materials, in order to study their acoustic characteristics and implement the results within auralization processes, a technique for recreating virtual sound environments corresponding to the acoustics of the real place.
Finally, the project, through the creation of these VR immersive experiences, aims to investigate the mutual influence between the visualization of the architectural space and the auralization of the acoustic landscape and how they affect the perception within the virtual environment.

Keywords
Auralization, virtual reality, AURA, acoustic heritage, Creative Europe

Topic
Simulating

The European Project AURA for the representation of the sound

doi.org/10.3280/oa-832-c163

Introduction

The Cultural and Creative Industries (CCI) are increasingly moving towards the implementation of modern technologies to explore new commercial horizons and attract new audiences [Bertocci et al. 2021]. This impulse has been accelerated in the last two years by the pandemic of COVID-19, which has highlighted the urgency of developing alternative proposals for the fruition of Artistic and Cultural Heritage.
This study is part of the project *AURA - Auralisation of Acoustic Heritage Sites Using Augmented and Virtual Reality*, co-funded since 2021 by the Creative Europe call, whose objective is to explore the potential of auralisation - a technique to simulate the acoustics of a given place within models [Kleiner et al. 1993] - by combining it with visual representations of the virtual world, in order to create a multisensory experience that reflects the appearance and acoustics of the actual place (fig. 01).

Fig. 01. The European Project AURA, its partnership and the three case studies: the Konzerthaus in Berlin (DE) (© Felix Löchner Sichtkreis), the Teatro del Maggio Fiorentino in Florence (IT) (© Michele Monasta), and the Opera and Ballet Theatre in Lviv (UA) (© Ruslan Lytvyn)

Indeed, the topic of acoustics is also increasingly debated in the context of cultural heritage documentation and preservation. In 2017, UNESCO introduced the document "The importance of sound in today's world: promoting best practices" [UNESCO 2017], highlighting how the soundscape of existing or historical places - the set of sounds, natural and artificial, that characterize a given place - deserves reflection, preservation, and scientific study [Katz et al. 2020].
These acoustic characteristics change over time and contribute to structuring the historical memory of a place, playing a fundamental role in the perception and enjoyment of the built environment.
The acoustics of an architecture is in fact an immaterial consequence of its construction, the materials used and the furnishing system, which constitute the tangible aspects of the heritage and which condition the design choices.
To reach AURA's goal, three emblematic European case studies were examined - the

Konzerthaus in Berlin (DE), the Teatro del Maggio Musicale Fiorentino in Florence (IT) and the Opera and Ballet Theater in Lviv (UA) - for each of which an appropriate methodology dedicated to digitization and virtual reconstruction was conceived, to obtain reliable assets on which to set the subsequent auralization processes and, following these, to develop multi-sensory 3D models, reliable and performing both in terms of graphic rendering and virtual fruition, and in terms of acoustics.

The methodological workflow

This paper illustrates the preliminary methodological steps addressed in the AURA project with reference to the digital survey and 3D modeling activities of the three case studies (Tab. 01).
In particular, the methodological workflow included an initial phase aimed at the digital survey through TLS, which was necessary both to ensure a reliable metric basis for the elaboration of the 3D modeling of the main halls, and to obtain a highly descriptive representation of the current state of the buildings and their interiors.
At the same time, a semantic subdivision of the elements and a classification of the related building materials were developed, based on which an investigation was carried out on the values of the acoustic parameters of the respective materials present [1], in order to create a parametric and properly coded acoustic database to support the subsequent auralization procedures.
The latter and all other virtualization operations have been developed by exploiting the multiple potentialities offered by the Unreal Engine software.
This platform allows, through specific plugins [2], both the interaction between different types of assets, such as textured 3D models and colored point clouds, to simulate and optimize the ArchViz of the environments, and their auralization, through the setting of music sources and sound materials associated to the values of the acoustic parameters investigated and to the respective surfaces of the imported 3D models.
To exemplify this operational workflow common to the three cases, a specific methodological aspect of each of these cases is presented below, addressed during this research experience, focusing in particular on the activities of the digital survey, 3D modeling and virtual interaction between the various assets processed, i. e. all those operations preparatory to the processes of auralization.

The digital survey of the Berlin Konzerthaus

The Berlin Konzerthaus is a neoclassical building initially built according to the design of architect Karl Friederich Schinkel on the site of the National Theater of Carl Gotthard Langhans, destroyed by a fire in 1817. It was built as a drama theater in the center of Gendarmenmarkt, a large square in the Mitte district characterized by the presence of two symmetrical churches, the Deutscher Dom and the Französischer Dom. Destroyed by bombing during World War II, the building was rebuilt and reopened only in 1984 as a concert hall. The twentieth-century renovation faithfully retained the exterior elevations but significantly altered the interiors, with the disappearance of the Italian-style theater hall, replaced by an enlarged copy of the former auditorium [Steffens 2004].
The documentation activities, carried out in September 2021, were carried out with a *Z+F 5016H* laser-scanner for the exteriors, the Gendarmenmarkt square, the foyer and the main hall, and with a *Faro Focus M70* for the stairwells and the side halls, acquiring a total of about 500 color scans (fig. 02).
The large amount of data obtained from the laser-scanner survey campaign was subsequently processed within the *Leica Cyclone 2020* software. The registration and reliability verification of the point cloud alignment was carried out. The portion of the point cloud related to the main hall was unified, exported, decimated and, subsequently, became the metric support for the dimensional matching of the 3D model (fig. 03A).

			KHB		MAG		LEO	
			int	ext	int	ext	int	ext
DIGITAL SURVEY								
ACQUISITION		*RGB TLS digital survey*	■	■	■	■	■	■
		SfM photogrammetric survey					■	
		On-site study on acoustic parameters	■	■	■	■	■	■
		On-site photographic survey for materials sampling			■			
PROCESSING		*Scans registration*	■	■	■	■	■	■
		SfM photogrammetric processes					■	
RESULTS		*RGB range-based point cloud*	■	■	■	■	■	■
		RGB image-based point cloud					■	
		2D CAD graphical drawings	■	■	■	■	■	■
3D MODELING								
PRELIMINARY PHASE		*Elements semantic subdivison*	■	■	■	■	■	■
		Materials classification	■	■	■	■	■	■
		Parametric & coded acoustic database	■	■	■	■	■	■
RECONSTRUCTION		*Morphological transformations on existing assets*	■					
		NURBS 3D modeling processes			■		■	
		Texturing processes			■			
INTERACTION								
PRELIMINARY PHASE		*Decimation of RGB point clouds*		■		■	■	■
ASSETS INTE-RACTION		*TLS RGB point cloud + SfM RGB point clouds + 3D model*	■	■	■	■	■	■
		Creation and optimization of the virtual environment	■	■	■	■	■	■
		Surfaces implementation of acoustic parameters values	■		■		■	
AURALIZATION								
PRELIMINARY PHASE		*Importing musicists avatars*	■		■		■	
		Importing and implementation of audio anechoic sources	■		■		■	
AURALIZATION PHASE		*Setting of specific interactive hotspots*	■		■		■	
		Spatialiation and acustic simulation	■		■		■	
VIRTUALIZATION								
VR APPLICATION		*Creation of a multisensorial immersive experience*	■	■	■	■	■	■

Tab. 01. Methodological workflow of the activities carried out for each case study

In fact, as a partner of the AURA project, the Konzerthaus institution provided a textured 3D model of the main hall, previously elaborated for another project (fig. 03B).
However, following specific morphological analyses conducted, it turned out that this model did not metrically reflect the real dimensional aspects of the complex, making some morphological modifications based on the more reliable point cloud necessary.
The original model of the hall has been resized through specific morphological transformation operations and referred to the coordinate system set for the global point cloud to integrate it within the environmental context of the square (fig. 03C).
Subsequently, as we will see also for the other cases, a semantic classification of the elements present in the main hall was elaborated and for each of them a different material was assigned, in order to facilitate the association of the respective acoustic values for the development of the subsequent auralization processes (fig. 03D).

Fig. 02. Panoramic view of the colored point cloud of the exterior area of the Berlin Konzerthaus

3D modeling of the Teatro del Maggio Musicale Fiorentino

The Teatro del Maggio Musicale Fiorentino, designed by architect Paolo Desideri of ABDR studio and opened in December 2011, represents one of the most relevant contemporary design initiatives in the Florentine architectural scene. Inside it hosts, in addition to numerous smaller rooms, three large theatrical venues: a recently opened auditorium, an open-air cavea and the main hall of the opera house, enclosed within a stereometric volume in the shape of a " horse-shoe" [Reinhold, Conta 2012].
The morphological documentation phase of the complex has been carried out since January 2021 and has involved acquiring its geometric and chromatic data through two different TLS, obtaining a total of 180 color scans with a *Z+F 5016H* and 120 in B/W with a *Faro Focus M70* respectively. These then underwent the same process of elaboration described above, from which a global point cloud was obtained which became both the metric basis for the phases of graphic restitution and 3D modeling of the main hall (fig. 05A), and the environmental background for the virtualization of the areas outside this one.
The three-dimensional elaboration has been conducted within the *Rhinoceros* software, through which, exploiting the potentialities of NURBS modeling, the 3D model of the main hall and its elements has been realized, based on 2D elaborations returned by range-based

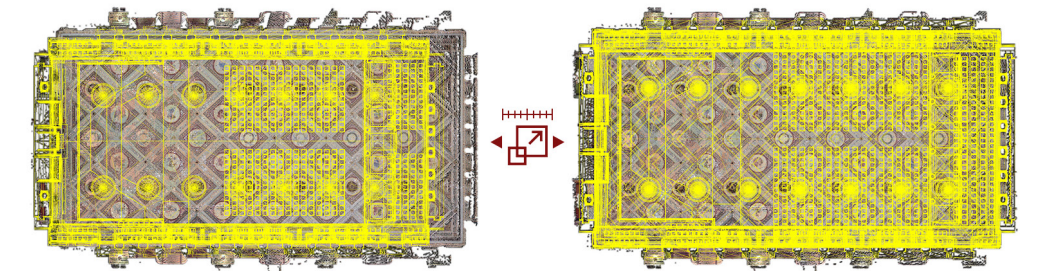
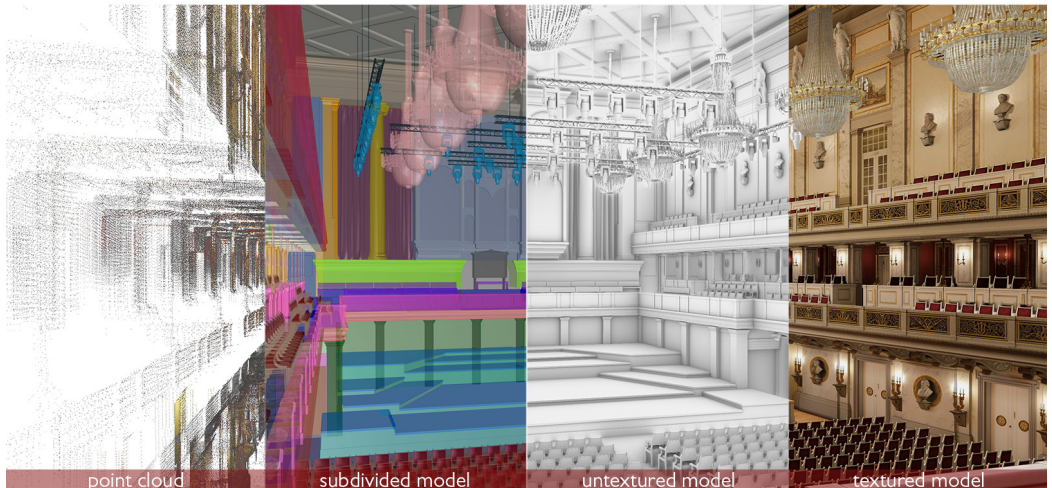



Fig. 03. Digital elaborations carried out for the virtualization of the Berlin Konzerthaus case study

data and, for some complex geometries, directly on portions of the decimated point cloud (fig. 05B). As previously stated, the modeling operations were conducted by referring to a semantic and material subdivision of the architectural components present, cataloging them into typological categories and associating them with codified virtual materials (fig. 05C).
These have thus made it possible to create a database on which to report the results of the acoustic investigations carried out on the values of the sound parameters to be associated with the various surfaces (fig. 05E) [Pompoli, Prodi 2000].
From this point of view, it was considered very important, in addition to the modeling of the architectural elements of the room, also that of the acoustic reflector systems, such as scattering panels or acoustic curtains, and of the furniture elements, such as armchairs, whose wide presence (over 1700) is extremely relevant in the acoustic study of the room, and consequently, in the auralization processes (figs. 05C, 05D).
Finally, before proceeding with these and the immersive virtualization on *Unreal Engine,* photographic campaigns were conducted aimed at sampling the real materials present in the hall, for each of which a photorealistic texture was created, with which, within the *Twinmotion* software, all surfaces of the 3D model were mapped, optimizing their graphical rendering for *ArchViz* (figs. 04, 05F) [Bertocci et al. 2022].

The interaction between 3D models, image-based data and range-based RGB data for virtual fruition of the Lviv Opera and Ballet Theater

The Opera and Ballet Theater in Lviv, Ukraine, was built at the end of the 19th century following a major competition held by the city, which at that time was the Austro-Hungarian capital of Galicia. The winning project was the one presented by Zygmunt Gorgolewski, who proposed the placement of the theater right in the center of the city, despite the environmental impediment of the Poltva River, planning to bury it in the area of construction of the new complex and providing for this one of the first examples in Europe of reinforced concrete foundations. The theater, built in neo-baroque style with some Art Nouveau elements, and enriched with stuccos, statues and oil paintings, hosts a large highly decorated Italian-style hall and concludes, outside, a long tree-lined avenue that over the years has become the centerpiece of the historic center, now under UNESCO protection [Sajo, 2013].
The digital survey phase was conducted in two different time tranches: the first at the beginning of 2021, in which the internal geometric data of the hall, foyer and corridors were acquired with 160 B&W scans using a *Leica C10* TLS, and the chromatic ones through SfM photogrammetric surveys (fig. 07B); while in the second one, carried out at the end of 2021, another 160 descriptive color scans of the external areas and, again, of the internal environments were acquired using a *Faro Focus M70*, in order to guarantee a homogeneous global coverage of the *range-based* RGB data (figs. 07A, 07C).

Fig. 04. Panoramic view of the textured 3D model of the main hall of the Teatro del Maggio Musicale Fiorentino case study

Fig. 05. Overview of the digital elaborations carried out for the virtualization of the Teatro del Maggio Musicale Fiorentino case study

The acquired data were then processed according to methods widely described, developing point clouds at different levels of metric and graphic detail (figs. 07A, 07B, 07C). The B&W one of the hall, geometrically more defined, was in fact, exploited for the realization of a non-textured NURBS model of the theatrical environment, also characterized by the semantic and material subdivisions necessary for the auralization (fig. 07D).
The ones with RGB data instead, developed from the photogrammetry and the second TLS survey, were first integrated to compensate for any shadow cones, and subsequently, subjected to data cleaning operations to obtain a global color point cloud that visually simulates the real environment. For this project of immersive virtualization it has been decided to experiment the interaction between these two typologies of assets, inserting inside the same virtual environment of *Unreal Engine* - and according to the same coordinates - both the 3D model with surfaces associated to the acoustic parameters of each material, and the colored point cloud of the whole complex (fig. 07E). The two 3D assets, overlapping each other and making the first one invisible during the VR experience, thus ensured both the environmental acoustic simulation developed by the auralization of the 3D model, and the realistic graphical rendering of the theater complex and its context thanks to the colored point cloud (figs. 06, 07F) [Bertocci et al. 2022].

Conclusions

The developments in the field of laser-scanner survey allow today to process increasingly reliable and highly descriptive data thanks to the integration of high-resolution cameras that acquire RGB color data, establishing 3D point clouds that can be used in a virtual environment, fully exploiting the large amount of data acquired [Cioli, Ricci 2020]. The AURA project aims, in fact, to realize multisensory models, reliable and performing both in terms of graphic rendering and virtual fruition, and in terms of acoustics, exploiting the integration of point clouds within graphics engines such as *Unreal Engine*. Following these methodological steps, three VR applications were thus obtained, allowing the user to navigate the point cloud of the exteriors of the theater and its foyer, and then enter the modeled space of the main hall, where freely choosing a position he/she can experience a perceptually multisensory experience, associating the immersive visual representation to a tangible virtual acoustic simulation. Through the integration between auralization and a reliable and realistic visual experience, based on data

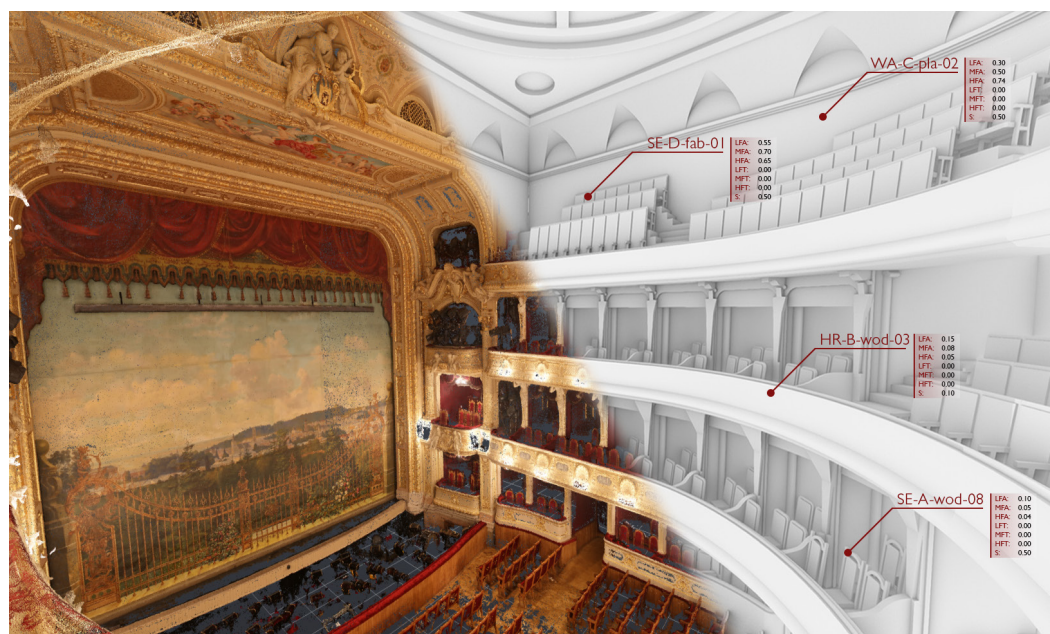



Fig. 06. Panoramic view of the main hall of the Lviv case study describing the interaction between different virtual assets: colored point clouds developed from TLS and SfM acquisitions, and 3D models with surfaces subdivided by materials and implemented with the respective values of acoustic parameters

Fig. 07. Overview of digital processing carried out for the virtualization of the Lviv Opera and Ballet Theatre case study

acquired through integrated TLS digital and photogrammetric Structure from Motion (SfM) survey techniques, it is possible to investigate the mutual influence that visual and acoustic stimuli have on the perception of the virtual experience. The goal of the project is to develop new opportunities for fruition through the engagement of expert and non-expert users, promoting innovation and cross-sector collaboration to build new audiences, business models, performance practices, and engaging experiences [Bertocci et al. 2021].

Notes

[1] The acoustic parameters considered for auralization are three: sound absorption and transmission frequencies (low, medium and high) and scattering.

[2] Lidar Point Cloud and Valve Steam Audio

Credits

Federico Cioli wrote the paragraphs "Introduction", "The digital survey of the Berlin Konzerthaus" and "Conclusions". Andrea Lumini wrote the paragraphs "The methodological workflow", "The 3D modeling of the Maggio Musicale Fiorentino Theater" and "The interaction between 3D models, image-based data and range-based RGB data for the virtual fruition of the Lviv Opera and Ballet Theater".

Content credits for figs. 00, 01 belong to Felix Löchner Sichtkreis for the photo of the Berlin Konzerthuas, Michele Monasta for the photo of the Maggio Musicale Fiorentino Theater, and Ruslan Lytvyn for the photo of the Lviv Opera and Ballet Theater. Graphic processing by the authors.

Credits for the content and graphic processing of figs. 02, 03, 04, 05, 06, 07 belong to and are by the authors.

AURA is a project co-funded by the Creative Europe program and led by the Berliner Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit mbH (BGZ), in collaboration with German academic partners from the Hochschule für Technik und Wirtschaft in Berlin (HTW), Italians from the Departments of Architecture (DIDA) and Industrial Engineering (DIEF) of the University of Florence (UNIFI) and Ukrainians from the Lviv Polytechnic National University (LPNU), supported by musical institutions such as the Konzerthaus in Berlin and marketing partners such as Vie en. ro.se. Ingegneria Srl of Florence, the Lviv Tourist Development Center of Lviv (UA) and Magnetic One of Ternopil (UA).

For more information, see the European project website: https://www.aura-project.eu.

Finally, the credits of the activities carried out by the respective technical partners of the AURA project are briefly presented. The HTW team, coordinated by Prof. J. Sieck, was responsible for the auralization of the models and the development of apps for their virtualization and use. The team of UNIFI-DIDA, coordinated by Prof. S. Bertocci, has carried out the activities of digital survey and data processing, as well as the 3D modeling of the theaters. The UNIFI-DIEF team, coordinated by Prof. M. Carfagni, has dealt with the preparatory investigation for the auralization of the values to be assigned to the acoustic parameters. The LPNU team, coordinated by Prof. I. Savchyn, carried out the first digital survey activities, TLS and SfM, of the Lviv case study. The Konzerthaus musical institution provided the textured model of the Berlin theater.

References

Bartalucci, C. et al. (2018). The Acoustic Design and Requalification of an Auditorium in a Church and of a Historical Theater. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Atti del convegno Florence Heri-Tech - The Future of Heritage Science and Technologies 16–18 Maggio 2018, Florence, Italy, vol. 364, pp. 1-8.

Bertocci S. et al. (in corso di stampa). Virtual reconstruction and 3D modeling for the auralization of acoustic Heritage: the case study of the Teatro del Maggio in Florence. In W. Börner, S. Uhlirz (Eds.). *Proceedings of CHNT 2021. 26th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies*. Vienna, Austria, 02-04 Novembre 2021. Heidelberg: Propylaeum.

Bertocci S. et al. (2021). Il progetto AURA: proposta di auralizzazione di alcuni teatri europei per la creazione di paesaggi sonori virtuali. In *Paesaggio Urbano - Urban Design, 2*(2), pp. 84-89.

Cioli F., Ricci Y. (2020). L'Officina Profumo-Farmaceutica di Santa Maria Novella. From the Point Cloud to the Virtual Reality. In Arena A., Arena M., Brandolino R. G., Colistra D., Ginex G., Mediati D., Nucifora S., Raffa P. (Eds). *Proceedings of UID 2020 - Connettere. Un disegno per annodare e tessere. 42° Convegno Internazionale dei docenti delle discipline della Rappresentazione*. Reggio Calabria e Messina, Italia, 17-19 Settembre 2020, pp. 1958-1973. Milano: FrancoAngeli,

Katz B. et al. (2019). Virtual reconstructions of the Théâtre de l'Athénée for archeoacoustic study, In *Proceedings of ICA 2019 - 23rd International Congress on Acoustics*. Aachen, Germany, 9-13 Settembre 2019, pp. 302-310. Red Hook (NY-USA): Curran Associates, Inc.

Katz B. et al. (2020). The Past Has Ears (PHE): XR Explorations of Acoustic Spaces as Cultural Heritage. In De Paolis L., Bourdot P. (Eds). 7° International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics, AVR 2020. Lecce, Italia, 7-10 Settembre 2020, vol. 12243, pp. 91-98. Cham: Springer.

Kleiner M. et al. (1993). Auralization - An overview. In *Journal of the Audio Engineering Society, 11*(41), pp. 861-875.

Pompoli R., Prodi N. (2000). Guidelines for acoustical measurements inside historical opera houses: procedures and validation. In *Journal of Sound and Vibration, 232*(1), pp. 281-301.

Reinhold J., Conta S. (2012). L'acustica del nuovo teatro dell'opera di Firenze: scelte innovative in un teatro (quasi) classico. In *Proceedings of AIA - 39° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica*. Roma, 4-6 Luglio 2012, pp. 1-6.

Sajó T. (2013). Urban Space as Erinnerungslandschaft. The Case of Lemberg/Lwów/Lvov/Lviv. In *European Review, 21*(4), pp. 523-529.

Steffens M. (2004). *K. F. Schinkel 1781-1841 un artista al servizio della bellezza (Basic art).* Köln: Taschen.

UNESCO (2017). The Importance of sound in today's world: promoting best practices. In *39° UNESCO General Conference, 39 C/49*. Parigi, 25 Settembre 2017 <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000259172> (consultato il 10 Febbraio 2021)

Weinzierl S., Lepa S. (2019). On the Potential of Virtual Realities for the Sciences. A Methodological Framework. In Ariso M. J. (Ed.). *Augmented Reality. Reflections on Its Contribution to Knowledge Formation*. Berlin / Boston: De Gruyter, pp. 61-80.

Authors
Andrea Lumini, Università di Firenze, DIDA, andrea.lumini@unifi.it
Federico Cioli, Università di Firenze, DIDA, federico.cioli@unifi.it

To cite this chapter: Lumini Andrea, Cioli Federico (2022). La rappresentazione del suono. Rilievo digitale e modellazione 3D per la virtualizzazione multisensoriale di tre grandi teatri europei/The representation of sound. Digital survey and 3D modeling for the multisensory virtualization of three major European theaters. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare. Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2621-2644.

Isbn 9788835141938